

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)  
Кафедра радиофизики  
Направление «Физика»



**ИСТОЧНИКИ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ НА СОЛНЦЕ  
НАД НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Магистерская работа студента  
дневного отделения

\_\_\_\_\_ **Арисовой Екатерины Михайловны**

Научный руководитель:

\_\_\_\_\_ д. ф.-м. н., в.н.с. **Яснoв Л.В.**

Рецензент:

\_\_\_\_\_ д. ф.-м. н. **Богод В. М.**

Санкт-Петербург  
2016

# Оглавление

Введение .....	3
1 Постановка задачи .....	5
2. Модельные расчеты.....	8
2.2 Модель с дополнительным диполем.....	8
2.2 Модель с токовым слоем.....	17
2.3 Модель Мока .....	21
Заключение.....	24
Литература .....	26
Приложение 1.....	27
Приложение 2.....	29

## Введение

В данной работе будут рассмотрены источники в активных областях, расположенных над нейтральной линией фотосферного магнитного поля (далее будем называть их NLS), причем особое внимание уделяется их связи с эруптивными процессами. А именно, будут приведены две возможные модели для интерпретации связи спектральных характеристик NLS (neutral line source) со вспышечной активностью: первоначально взаимодействие магнитных потоков в атмосфере Солнца рассматривалось исключительно как результат всплывание нового магнитного потока обратного знака вблизи уже существовавшего магнитного поля, что приводит к уменьшению интенсивности излучения NLS. Однако, в солнечной короне имеет место эффект магнитного пересоединения, что приводит к формированию токового слоя, в котором накапливается избыток электромагнитной энергии. Согласно концепции, описанной в работе [1], кумуляция магнитной энергии и образование токового слоя соответствует предвспышечной ситуации, а собственно сама вспышка происходит в результате разрушения слоя и преобразования накопленной энергии в тепловую и кинетическую энергию плазмы и потоки высоко энергетичных частиц. Аннигиляция магнитного поля также приводит к уменьшению интенсивности NLS.

История обнаружения радиоисточников над нейтральной линией, разделяющей противоположные полярности фотосферного магнитного поля, связана с наблюдением солнечных затмений и с использованием крупных радиотелескопов для изучения детальной структуры активных областей на Солнце.

На существование в солнечных активных областях NLS было впервые указано в работах [2] по наблюдениям на Westerbork Synthesis Radio Telescope, на волне 6 см. В дальнейшем эти источники были более детально проанализированы в работах [3], [4]. Стоит отметить, что это относительно стабильные, яркие, довольно компактные микроволновые источники, проекция которых на фотосферное магнитное поле совпадает с его нейтральной линией, то есть с областью нулевого продольного поля.

В ряде работ изучался вопрос о природе NLS. Так в работах [3], [4] говорится о гирорезонансной природе этих источников в горячей плазме с магнитными полями 400-600 Гаусс. В работе [5] утверждается, что гирорезонансный механизм не может дать NLS, так как поле между источниками мало. Но мало только продольное поле. Авторы стараются объяснить существование NLS излучением нетепловых среднерелятивистских электронов со степенным спектром, показатель которого равен 4-5. При этом они указывают на трудную проблему сохранения длительной стабильности генерации такого излучения. Поскольку температура гиротронного излучения может достигать  $10^8 - 10^{10}$  К, что не наблюдается, то авторам пришлось предложить довольно сложную конструкцию с поглощающим экраном в виде большого количества мелкомасштабных неоднородностей в неравновесной корональной плазме.

Однако, основная проблема здесь – существенная нестабильность излучения. В то время как NLS являются стабильными источниками в широком диапазоне длин волн. Такой результат был получен, например, в новых наблюдениях NLS's на радиотелескопе PATAN-600 в диапазоне 15-6 GHz.

Была предложена интерпретация радиоизлучения над нейтральными линиями как возникновение также небольшой популяции нетепловых электронов (около  $10^{30} - 10^{31}$ ) с показателем степени мощности распределения  $\delta = 3$ . В работе [6] указывается на трудности интерпретации излучения NLS источников циклотронным излучением на 3 гармонике гирочастоты и привлекают для объяснения 4 гармонику аналогично работе [7]. Авторы, однако, признают, что природа излучения NLS все еще неясна.

Оставаясь в рамках теплового механизма излучения необходимо иметь высокую температуру в области излучения NLS. Дополнительных нагрев может быть связан с

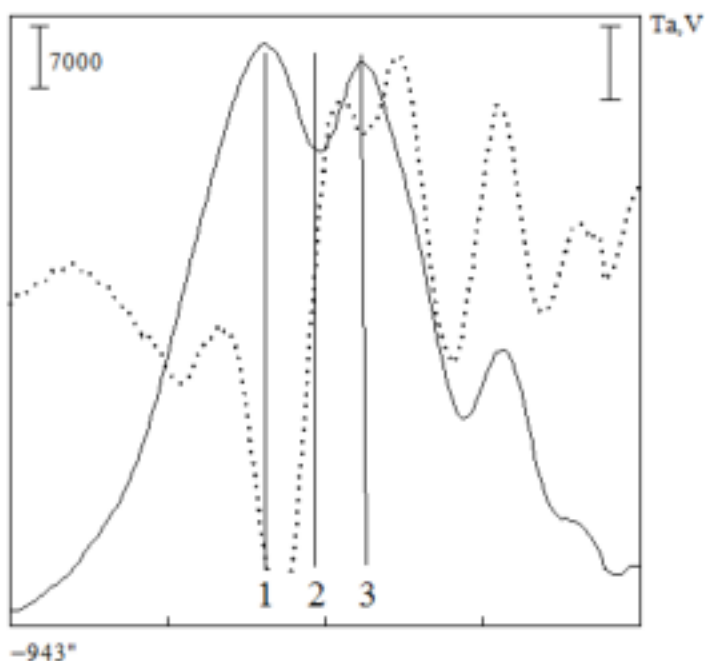
существованием токового слоя. В работе [8] показано, что NLS является сочетанием петли и диффузной области токового слоя. Это может привести к дополнительному нагреву области NLS и дать высокую температуру излучения NLS. В исследовании [9] рассматривался вопрос о дополнительном нагреве плазмы в таких источниках, что интерпретировалось как проявление высокотемпературных токовых слоев на предвспышечной стадии в активной области.

Стоит обратить внимание, что связь NLS со вспышечной активностью отмечалась в целом ряде работ [10]. На основе регулярных спектрально-поляризационных наблюдений Солнца на РАТАН-600, начатых в 1975 г, с высоким пространственным разрешением в широком микроволновом диапазоне, на примере многих эруптивных событий было показано, что перед мощной вспышкой наблюдалось развитие радиоисточника над нейтральной линией фотосферного магнитного поля над местом максимального сближения полей противоположного знака, который за 1–2 дня до мощной вспышки становился доминирующей компонентой в структуре микроволнового излучения всей активной области [11]. Таким образом, особый интерес представляет исследование связи спектральных характеристик NLS со вспышечной активностью.

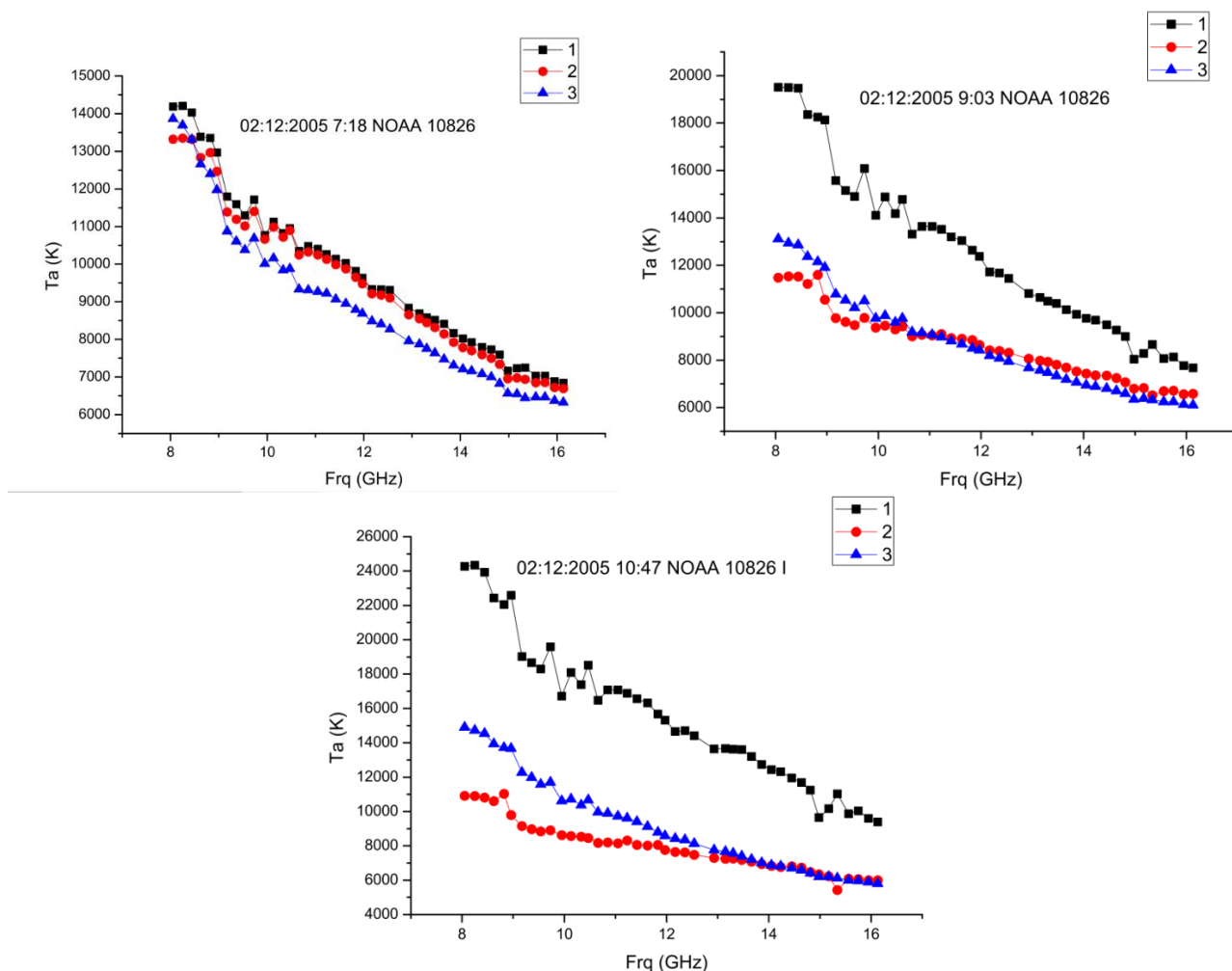
## 1. Постановка задачи

Из данных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 [13] известно, что за несколько часов перед вспышкой отмечается уменьшение интенсивности излучения NLS. Так, например, рассмотрим активную область NOAA 10826, наблюдения над которой проводились 2.12.2005 с 7:18 по 10:47 UT. В этот период в данной области возникла вспышка класса M7.8.

На рис.1 приведены сканы активной области на волне 3.27 см, в которой выделены источники 1-3. На рис.2 представлены спектры антенных температур этих источников в разные моменты времени.



**Рис.1** Сканы активной области NOAA 10826 в каналах I (сплошная линия) и V на волне 3.27 см, в которых выделены источники 1-3.



**Рис.2** Спектры антенных температур  $T_a$  в канале I для источников 1-3 в активной области NOAA 10826 в различные моменты времени (с 7:48 до 10:47), где источник 2 – NLS.

Из рис.2 видно, что интенсивность NLS заметно уменьшилась перед вспышкой как по абсолютной величине, так и по отношению к другим источникам. Отметим на данном примере, что интенсивность NLS уменьшается на 10-20%. Таким образом, одним из критериев оценки рассматриваемых в этой работе моделей является соответствие этому факту.

В работе [12] была предложена и проанализирована модель, содержащая два разнесенных противоположно направленных диполя, описывающая магнитное поле NLS. В этой работе было показано, что в области расположения NLS отмечается высокая интенсивность излучения одновременно с низкой степенью поляризации в коротковолновой части сантиметрового диапазона. Далее будем опираться на эту модель.

Известно, что крупные вспышки связаны со всплытием нового магнитного потока обратного знака вблизи существовавшего магнитного поля. Поэтому мы введем новый диполь с такой же глубиной диполя под фотосферой, но с меньшим значением магнитного поля на фотосфере и на небольшом расстоянии от основного диполя. Появление дополнительного диполя противоположной направленности должно приводить к исчезновению наиболее эффективно излучающих гирорезонансных уровней и, как следствие, к уменьшению интенсивности излучения NLS.

Однако, по современным представлениям перед вспышкой формируется токовый слой, появление которого вызвано аннигиляцией магнитного поля на корональных высотах. Это также приводит в NLS либо к исчезновению наиболее эффективно излучающих

гирорезонансных уровней, либо их перемещению в нижележащие слои солнечной атмосферы, либо к уменьшению их эффективной излучающей площади. Во всех случаях это должно приводить к заметному ослаблению циклотронного излучения NLS. Поскольку формирование токового слоя наиболее вероятно в корональной области, то это должно приводить к более существенному изменению интенсивности излучения на более длинных волнах, что подтверждается данными наблюдений [13]. При этом остается неизменным тепловое тормозное излучение хромосферы, что также должно приводить к более существенному изменению интенсивности излучения на более длинных волнах. При этом фотосферное магнитное поле может оставаться практически неизменным.

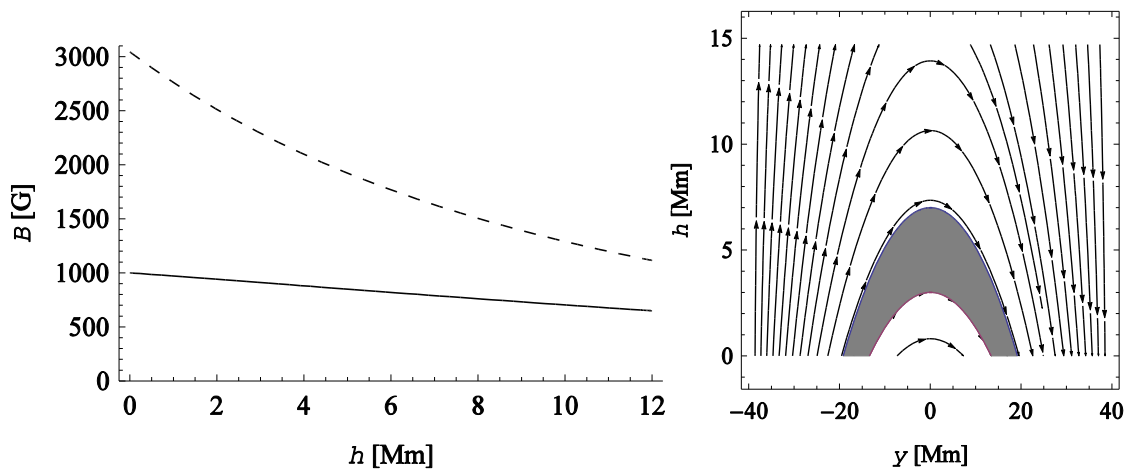
Таким образом, каждая модель хорошо описывает связь NLS со вспышечной активностью, хотя представление о формировании токового слоя является более обоснованным с физической точки зрения. Тем не менее, в данной работе будут рассмотрены обе модели и проведен их сравнительный анализ, а так же сравнение с данными наблюдений.

## 2. Модельные расчеты

В этой главе мы более подробно рассмотрим две предложенные модели для интерпретации связи NLS со вспышечной активностью.

### 2.1 Модель с дополнительным диполем

Итак, как уже было сказано выше, мы будем использовать уже существующую модель [12] (формулы, описывающее магнитное поле, соответствующее данной модели, представлены в приложении 1), содержащую два разнесенных и противоположно направленных диполя, обладающую следующими параметрами: предполагаем, что область на фотосфере на оси диполей имеет напряжённость 3000 G, глубина диполей под фотосферой  $r_0 = 3 \cdot 10^9$  см, диполи находятся на расстоянии  $d = 7.74802 \cdot 10^9$  см, поле на фотосфере между ними  $B_{nls} = 1000$  G. Некоторые характеристики этого поля представлены на рис.3.



**Рис.3** Зависимости магнитного поля на оси диполей ( $y = d/2$ , пунктир) и между диполями ( $y = 0$ ) (слева) и магнитные силовые линии с петлями (справа) .

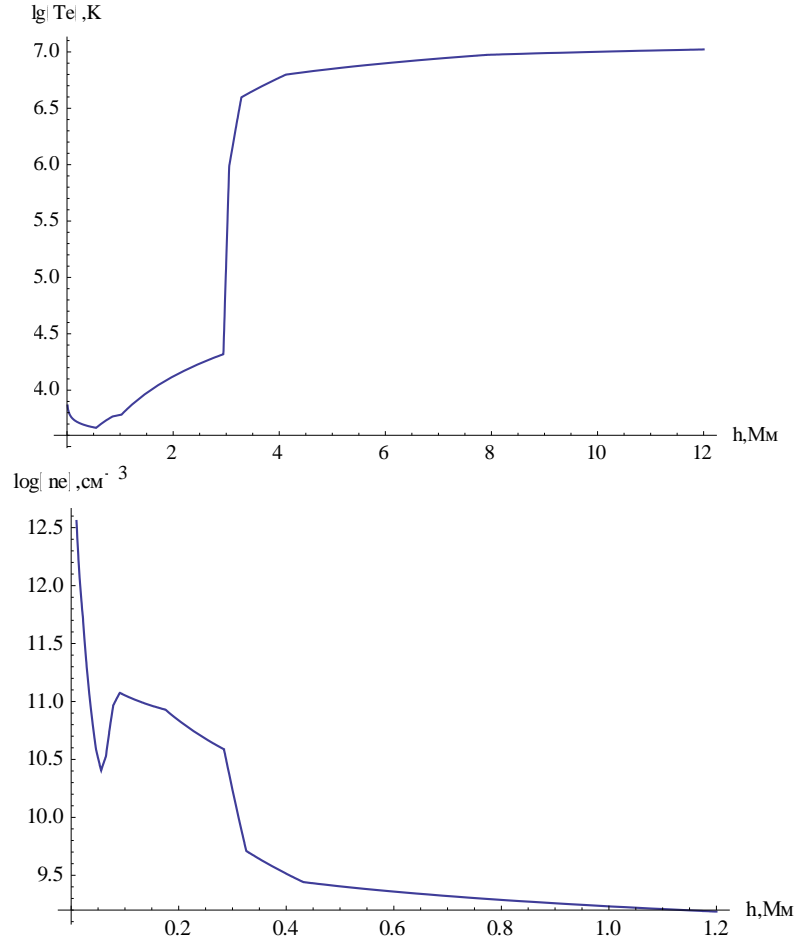
Отметим, что в данной модели учитывается тепловое тормозное излучение хромосферы. Тормозное излучение короны и переходной области для простоты учитывать не будем, так как вклад этого излучения незначителен. Необходимо для сравнения с наблюдениями учитывать, что все результаты должны быть усреднены по диаграмме направленности радиотелескопа РАТАН-600. Будем приближенно полагать ее форму в следующем виде:

$$\exp\left(-\frac{f^2 y^2}{3.18 \cdot 10^{38}}\right) \quad (1)$$

где  $f$ —частота,  $y$  – расстояние в азимутальном направлении вдоль активной области в см.

Изменения электронной температуры и плотности с высотой для используемой модели [15] показаны на рис.4.





**Рис.4** Изменения электронной температуры  $T_e$  при  $y = 0$  и плотности  $n_e$  (не зависит от  $y$ ) с высотой  $h$ . [15].

Для учета циклотронного поглощения введем следующие величины:

- Коэффициент циклотронного поглощения на гармониках  $s \geq 2$ :

$$\mu_{js} \approx B_{js} \frac{s^{2s}\omega}{2^s s! c} \beta^{2s-3} \exp(-Z_{js}^2), \text{ где}$$

$$B_{js} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} v \left[ n_j^{2s-4} \tau_j^2 (1 + g_j)^2 \cos \theta_j \right] (\sin^{2s-2} \alpha) \frac{1}{|\cos \alpha|} \quad |\omega = s\omega_B, \quad (2)$$

$$Z_{js} = \frac{\omega - s\omega_B}{\sqrt{2} \omega n_j \beta \cos \alpha},$$

$$\beta = \sqrt{\left( \frac{kT}{mc^2} \right)}.$$

- Толщина гирорезонансного уровня:

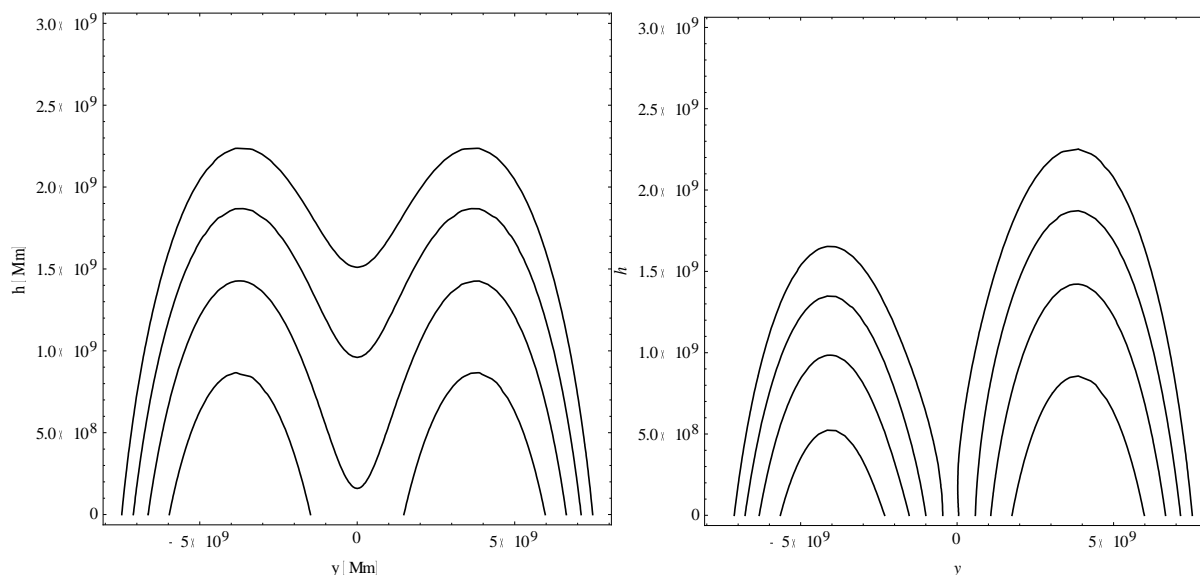
$$\tau_{js} = \sqrt{2\pi} \frac{s^{2s}}{2^s s!} \left( \frac{\omega}{c} \right) \beta^{2s-2} n_j B_{js} L_B |\cos \alpha|, \text{ где } L_B = \omega_B \left| \frac{dl}{d\omega_B} \right|. \quad (3)$$

Тогда циклотронное излучение от гирорезонансных слоев с гармониками  $s=2-5$  можно представить в виде:

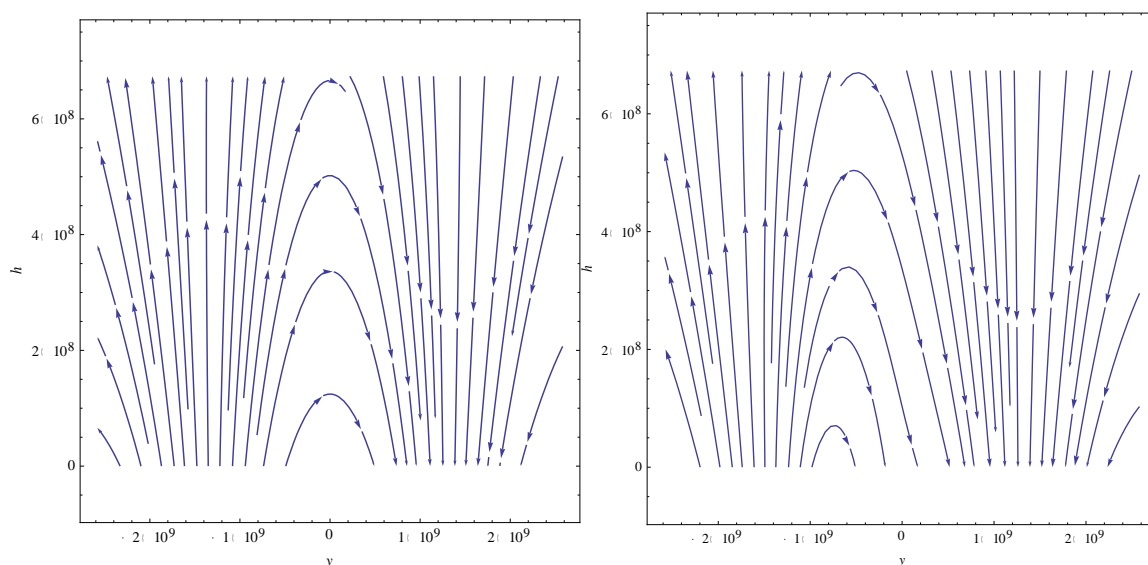
$$T_b = T_e(y, h) [1 - e^{-\tau^2}] e^{-\tau^3 - \tau^4 - \tau^5} + T_e(y, h) [1 - e^{-\tau^3}] e^{-\tau^4 - \tau^5} + T_e(y, h) [1 - e^{-\tau^4}] e^{-\tau^5} + T_e(y, h) [1 - e^{-\tau^5}] + T_{ch} e^{-\tau^2 - \tau^3 - \tau^4 - \tau^5} \quad (4)$$

Далее, чтобы выявить связь спектральных характеристик NLS со вспышечной активностью, вводим дополнительный диполь с такой же глубиной залегания под фотосферой, но с меньшим значением магнитного поля на фотосфере –  $B_{ph}/u$  ( $u>1$ ) и на небольшом расстоянии от основного диполя –  $d/x$  ( $x>2$ ).

Из рис.5-6 видно, что появление дополнительного диполя противоположной направленности вблизи основного диполя приводит к исчезновению наиболее эффективно излучающих гирорезонансных уровней в области расположения NLS, что в свою очередь должно приводить к значительному ослаблению его излучения.

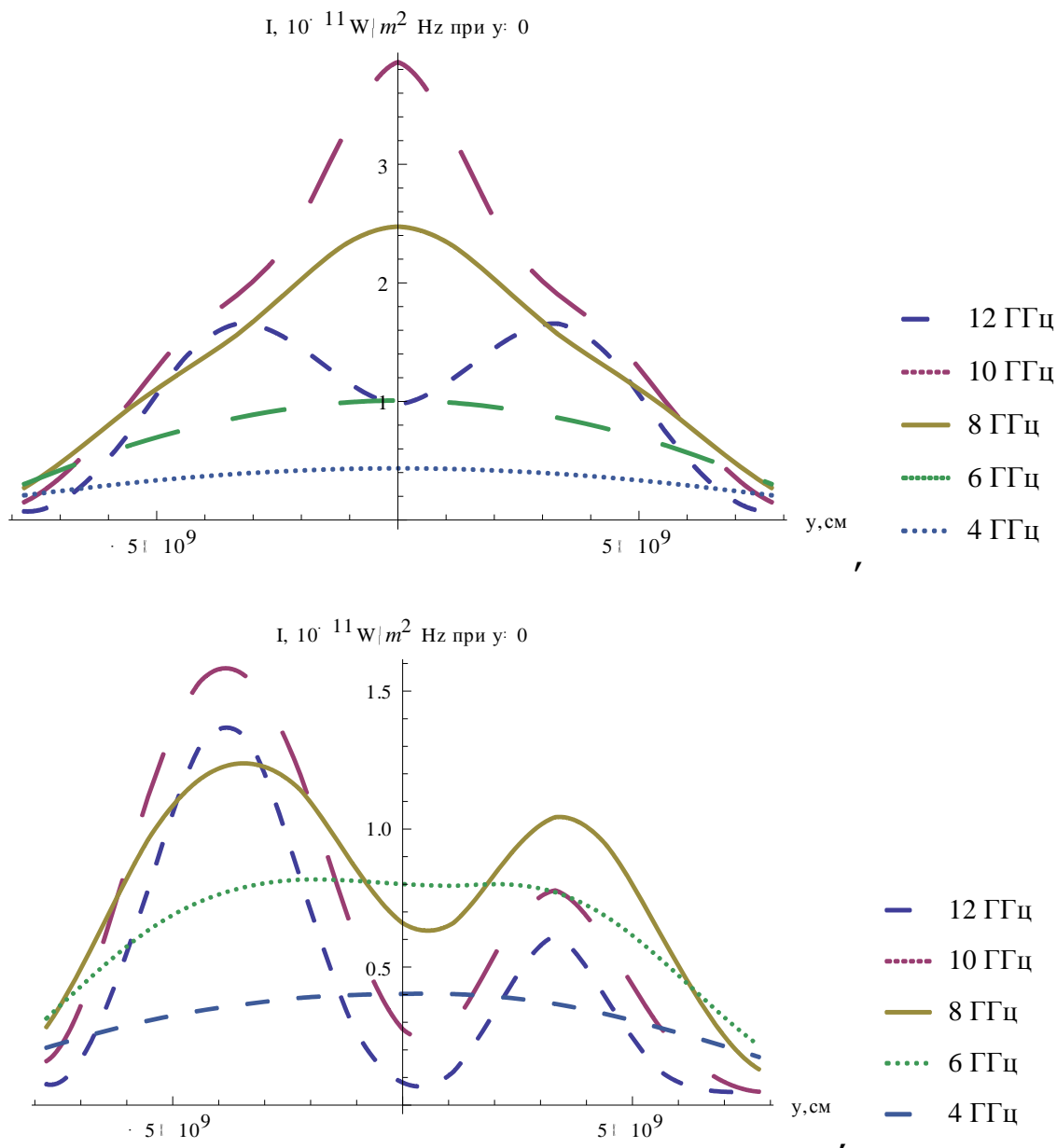


**Рис.5** Гирорезонансные уровни на частоте 8 ГГц на гирогармониках  $s = 2,3,4,5$  для модели без дополнительного диполя (слева) и для модели с дополнительным диполем ( $u=2$ ,  $x=d/5$ ) (справа).

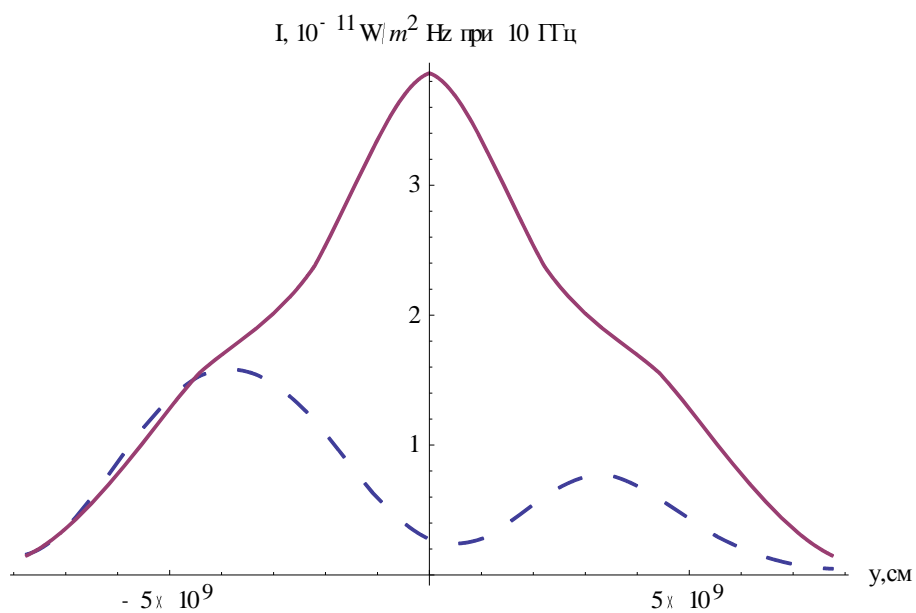


**Рис.6** Магнитные силовые линии для модели без дополнительного диполя (слева) и для модели с дополнительным диполем (справа).

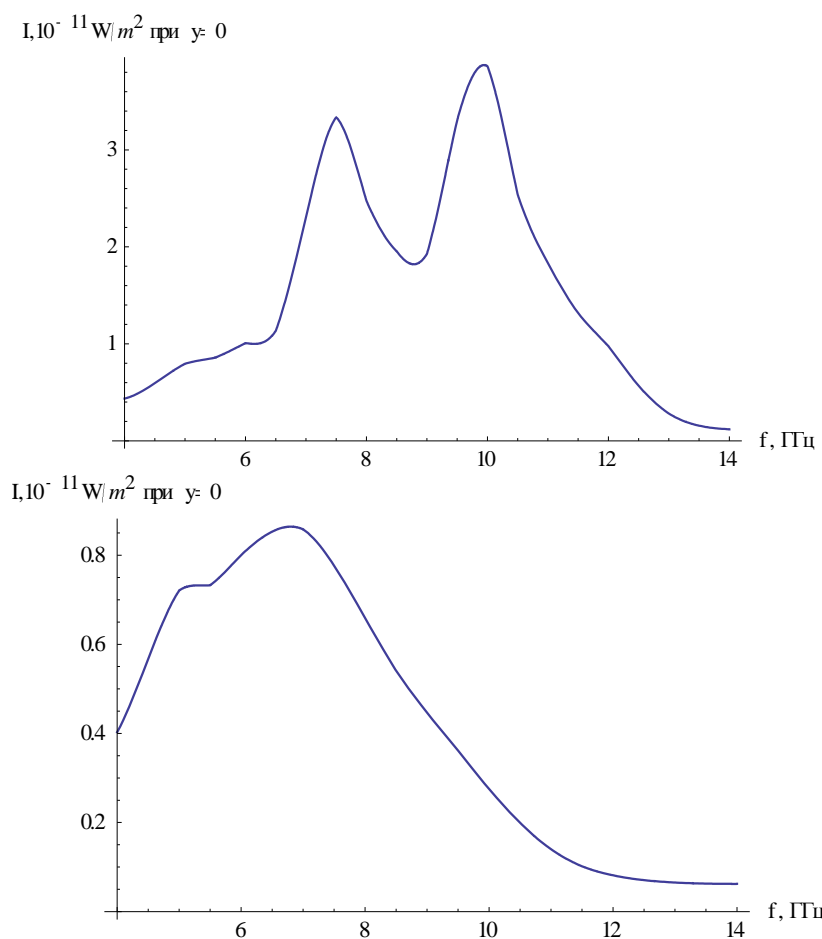
Теперь рассмотрим, как повлияет появление дополнительного диполя на распределение интенсивности. Из рис.7-9, представленных ниже, видно, что интенсивность излучения в области расположения NLS заметно уменьшается: так на частоте 10 ГГц - примерно на 75%, однако, с уменьшением частоты эта разница становится все менее заметной. На частоте 6 ГГц она составляет всего около 20%. И все же стоит отметить, что такое изменение интенсивности гораздо больше того, которое следует из данных наблюдений и составляет около 10-20%. Тем не менее, при определенных параметрах дополнительного диполя данная модель все-таки соответствует данным наблюдений, так на частоте 10 ГГц уменьшение интенсивности составляет около 20% при параметрах  $x=d/10$  и  $u=32$ . Соответствующие результаты представлены ниже на рис.10.



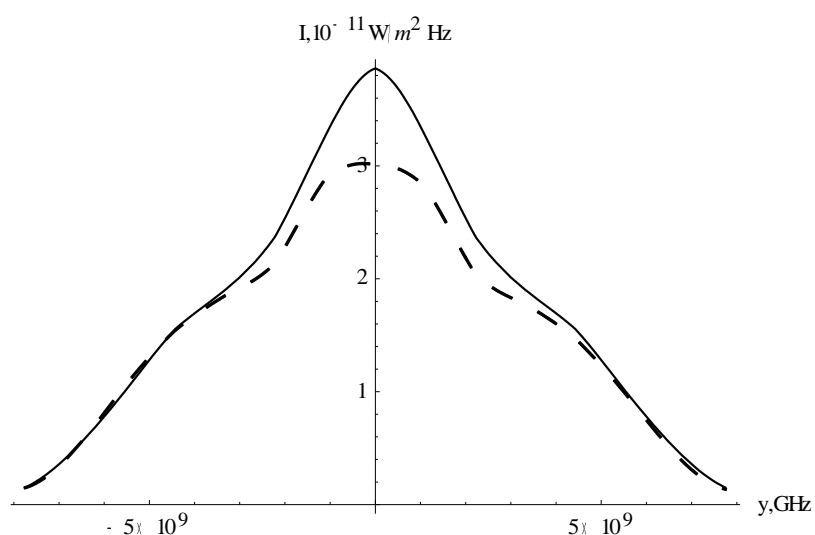
**Рис.7** Распределение параметра Стокса  $I$  на частотах 4 - 10 ГГц для модели без дополнительного диполя (сверху) и для модели с дополнительным диполем (снизу)



**Рис.8** Распределение параметра Стокса I на частоте 10 ГГц для модели без дополнительного диполя (сплошная линия) и для модели с дополнительным диполем (пунктир)

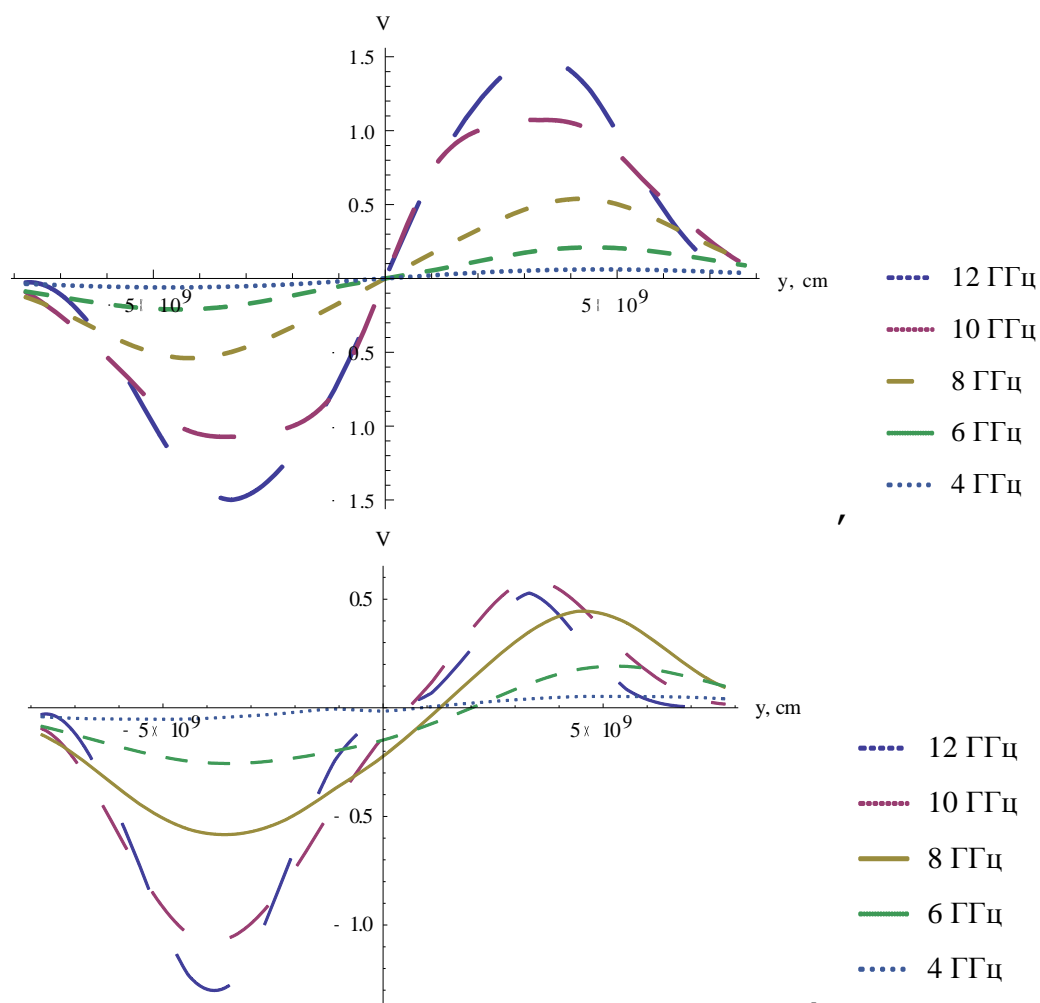


**Рис.9** Спектр параметра Стокса I для модели без дополнительного диполя (сверху) и для модели с дополнительным диполем (снизу)



**Рис.10** Распределение параметра Стокса I на частоте 10 ГГц для модели без дополнительного диполя (сплошная линия) и для модели с дополнительным диполем (пунктир) при параметрах  $\chi=d/10$  и  $u=32$ .

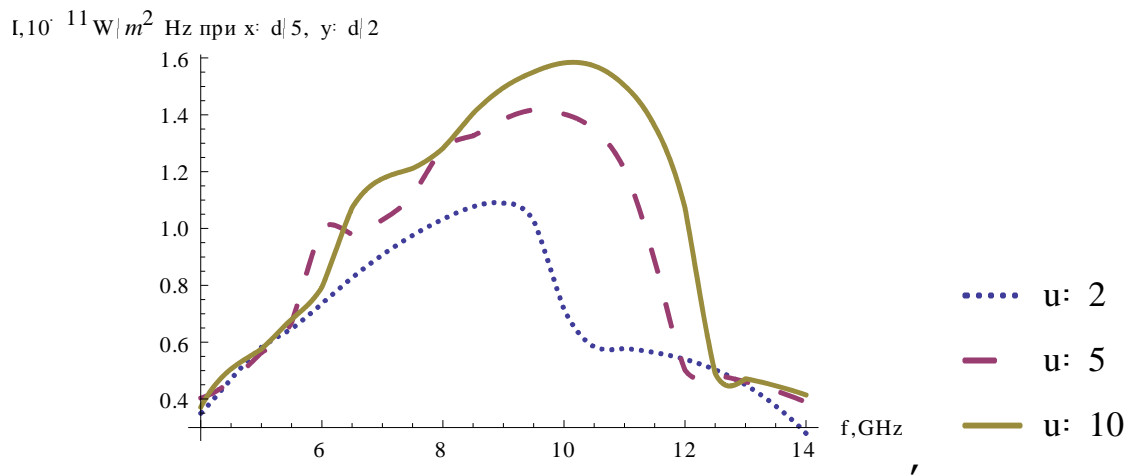
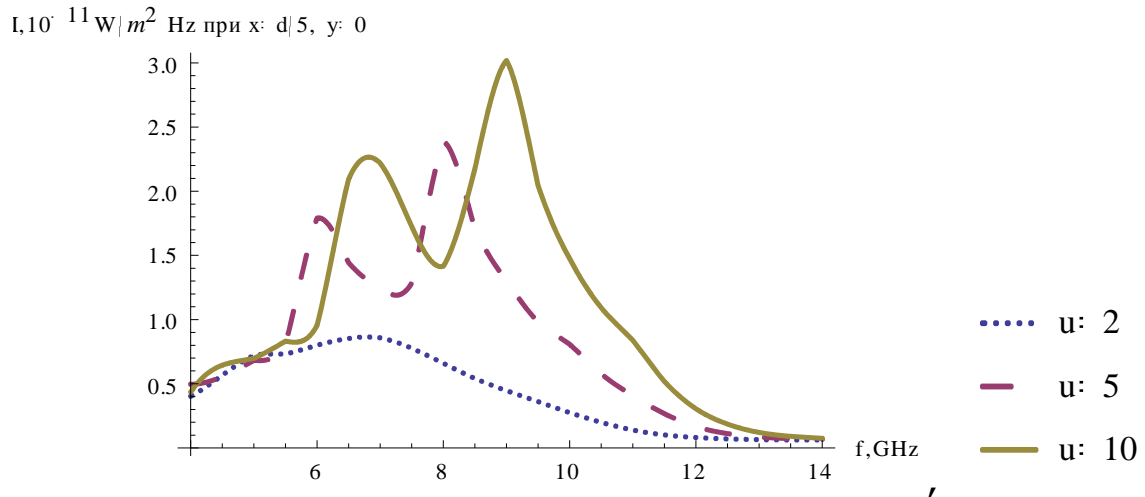
Наряду с уменьшением интенсивности излучения, уменьшается также и степень поляризации, что можно увидеть на рис.11.



**Рис.11** Распределение параметра Стокса V на частотах 4 - 10 ГГц для модели без дополнительного диполя (сверху) и для модели с дополнительным диполем (снизу)

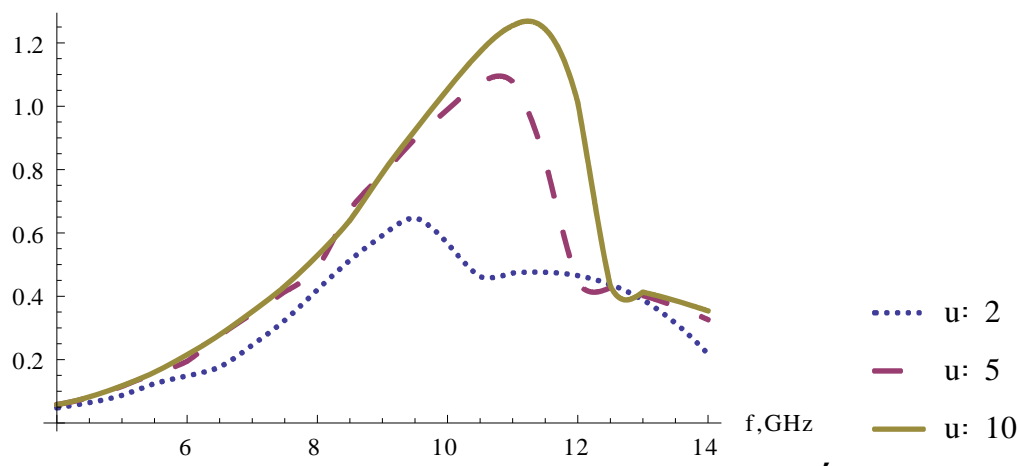
Как уже говорилось, дополнительный диполь в данной модели имеет два основных параметра:  $x$  определяет положение дополнительного диполя относительно основного,  $u$  – значение магнитного поля дополнительного диполя на фотосфере ( $B_{ph}/u$ ). Поэтому далее рассмотрим, как меняются спектральные характеристики NLS при изменении параметров дополнительного диполя.

Во-первых, зафиксируем положение диполя  $x=d/5$  и будем менять величину параметра  $u$ . Полученные результаты представлены на рис.12-13.



**Рис.12** Частотное распределение параметра Стокса I для модели с дополнительным диполем при  $y=0$  (сверху) и на оси диполей при  $y=d/2$  (снизу).

$V, 10^{-11} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$  при  $x: d/5, y: d/2$

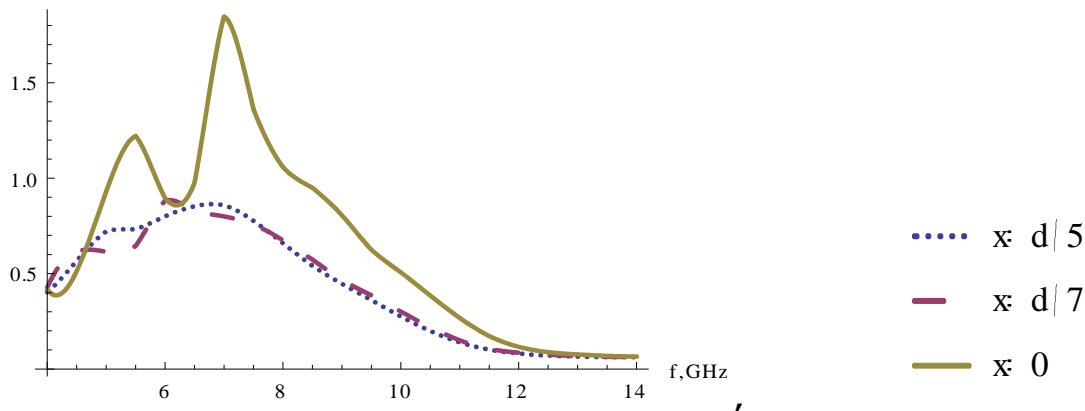


**Рис.13** Частотное распределение параметра Стокса V для модели с дополнительным диполем на оси диполей при  $y=d/2$ .

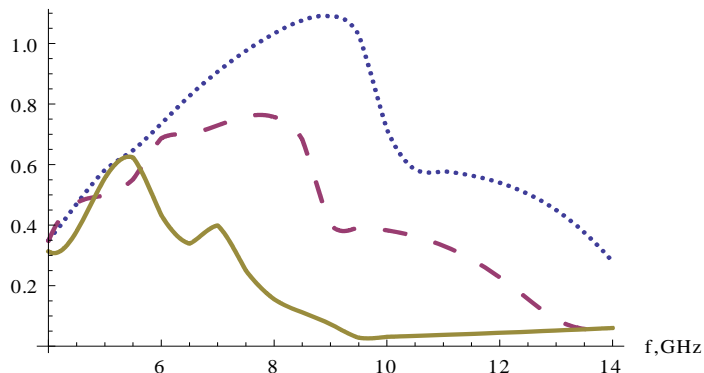
Из представленных графиков видно, что чем больше магнитное поле дополнительного диполя, тем более сильное влияние он оказывает как на изменение интенсивности излучения, так и на степень поляризации, приводя к большему уменьшению этих спектральных характеристик по сравнению с исходной моделью двух диполей. Причем наиболее заметно эта зависимость проявляется на более высоких частотах (10 – 12 ГГц).

Во-вторых, зафиксируем значение магнитного поля дополнительного диполя –  $B_{ph}/2$  ( $u=2$ ) и будем менять его положение относительно основного диполя (см. рис. 14-15):

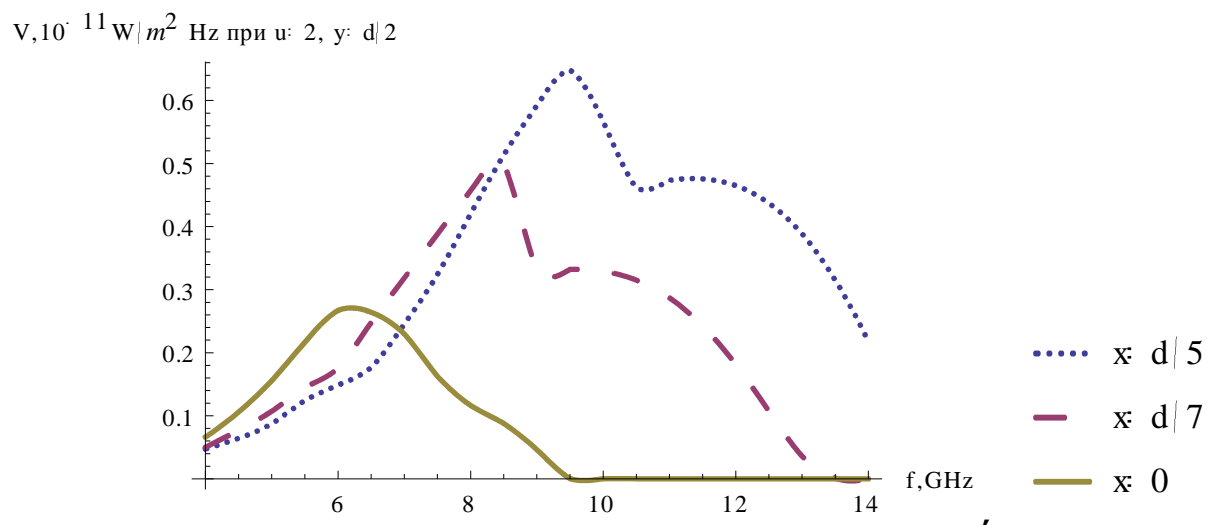
$I, 10^{-11} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$  при  $u: 2, y: 0$



$I, 10^{-11} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$  при  $u: 2, y: d/2$



**Рис.14** Спектр параметра Стокса I для модели с дополнительным диполем при  $y=0$  (сверху) и на оси диполей при  $y=d/2$  (снизу).



**Рис.15** Спектр параметра Стокса  $V$  для модели с дополнительным диполем на оси диполей при  $y=d/2$ .

Следовательно, чем ближе располагается дополнительный диполь к месту расположения NLS, тем заметнее уменьшается интенсивность излучения и степень поляризации.

Таким образом, изменение спектральных характеристик NLS напрямую зависит от параметров дополнительного диполя, но наиболее ярко эта зависимость проявляется на более высоких частотах (более 6 ГГц), что видно из рис.12-15, представленных в этом разделе.



## 2.2 Модель с токовым слоем

В космических условиях имеет место эффект магнитного пересоединения, который заключается в перераспределении магнитных потоков, изменяющим их топологическую связность [1]. При взаимодействии магнитных потоков в солнечной короне в активных областях образуется токовый слой, неустойчивость которого и приводит к генерации энергичных частиц. Таким образом, можем утверждать, что модель токового слоя может быть использована для интерпретации связи спектральных характеристик NLS со вспышечной активностью.

Как и в предыдущем случае, за основу возьмем модель двух разнесенных потивоположно направленных диполей [12]. Введем в нее сомножитель, описывающий токовый слой.

$$g(\sigma) = \begin{cases} \left| y \frac{\sigma}{d} \right| + 0.1, & |y| < 0.9 \frac{d}{\sigma} \\ 1, & |y| \geq 0.9 \frac{d}{\sigma} \end{cases} \quad (5)$$

где  $d = 7.74802 \cdot 10^9$  см – расстояние между диполями, полученное по формуле (9),  $y$  – расстояние в азимутальном направлении вдоль активной области в см,  $\sigma$  – параметр задачи, определяющий размер области магнитного пересоединения.

Соответствующие формулы, описывающие эту модель, приведены ниже:

- Размер области магнитного пересоединения.

$$b = 0.9 \frac{d}{\sigma} \quad (6)$$

- Первый диполь. Компоненты магнитного поля.

$$B_{1h}(h, y) = g(\sigma) M \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \left( 2(h + r_0)^2 - \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right) \quad (7)$$

$$B_{1y}(h, y) = g(\sigma) M \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} 3(h + r_0) \left( y + \frac{d}{2} \right)$$

- Второй диполь. Компоненты магнитного поля.

$$B_{2h}(h, y) = g(\sigma) M \left( (h + r_0)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \left( 2(h + r_0)^2 - \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right) \quad (8)$$

$$B_{2y}(h, y) = g(\sigma) M \left( (h + r_0)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} 3(h + r_0) \left( y - \frac{d}{2} \right)$$

- Расстояние между диполями при заданном магнитном поле между диполями –  $B_{nls}$  и глубине погружения диполя под фотосферу –  $r_0$ .

$$d = \sqrt{\frac{1024 B_{nls}^2 r_0^{10} + (-9216 M^2 r_0^2 + 1280 B_{nls}^2 r_0^8) x + 640 B_{nls}^2 r_0^6 x^2 + 160 B_{nls}^2 r_0^4 x^3 + 20 B_{nls}^2 r_0^2 x^4 + B_{nls}^2 x^5}{}} \quad (9)$$

- Напряженность магнитного поля с двумя диполями с учетом влияния токового слоя

$$b(h, y) = g(\sigma)M \sqrt{\left( \frac{3(h+ro)\left(-\frac{d}{2}+y\right)}{\left((h+ro)^2+\left(-\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} - \frac{3(h+ro)\left(\frac{d}{2}+y\right)}{\left((h+ro)^2+\left(\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} \right)^2 + \left( \frac{2(h+ro)^2-\frac{1}{4}(d-2y)^2}{\left((h+ro)^2+\left(-\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} - \frac{2(h+ro)^2-\frac{1}{4}(d+2y)^2}{\left((h+ro)^2+\left(\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} \right)^2} \quad (10)$$

- Градиент магнитного поля:

$$L_b = g(\sigma) \left| \frac{\left( \left( \frac{3Zh1Zh2}{Zn1^{5/2}} - \frac{3Zh1Zh3}{Zn2^{5/2}} \right)^2 + \left( \frac{Zp1}{Zn1^{5/2}} - \frac{Zp2}{Zn2^{5/2}} \right)^2 \right)}{\left( \left( -\frac{15Zh1^2Zh2}{Zn1^{7/2}} + \frac{3Zh2}{Zn1^{5/2}} + \frac{15Zh1^2Zh3}{Zn2^{7/2}} - \frac{3Zh3}{Zn2^{5/2}} \right) \left( \frac{3Zh1Zh2}{Zn1^{5/2}} - \frac{3Zh1Zh3}{Zn2^{5/2}} \right) + \left( -\frac{5Zh1Zp1}{Zn1^{7/2}} + \frac{4Zh1}{Zn1^{5/2}} - \frac{4Zh1}{Zn2^{5/2}} + \frac{5Zh1Zp2}{Zn2^{7/2}} \right) \left( \frac{Zp1}{Zn1^{5/2}} - \frac{Zp2}{Zn2^{5/2}} \right) \right)} \right|, \text{ где}$$

$$Zn1 = (h + ro)^2 + \left( -\frac{d}{2} + y \right)^2,$$

$$Zn2 = (h + ro)^2 + \left( \frac{d}{2} + y \right)^2,$$

$$Zp1 = 2(h + ro)^2 - \frac{1}{4}(d - 2y)^2,$$

$$Zp2 = 2(h + ro)^2 - \frac{1}{4}(d + 2y)^2,$$

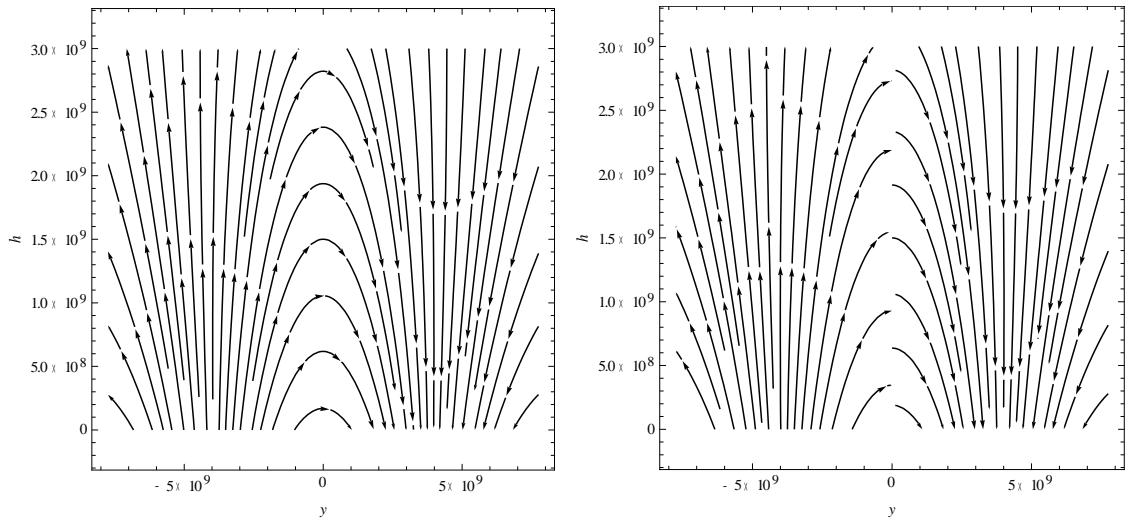
$$Zh1 = (h + ro),$$

$$Zh2 = \left( -\frac{d}{2} + y \right),$$

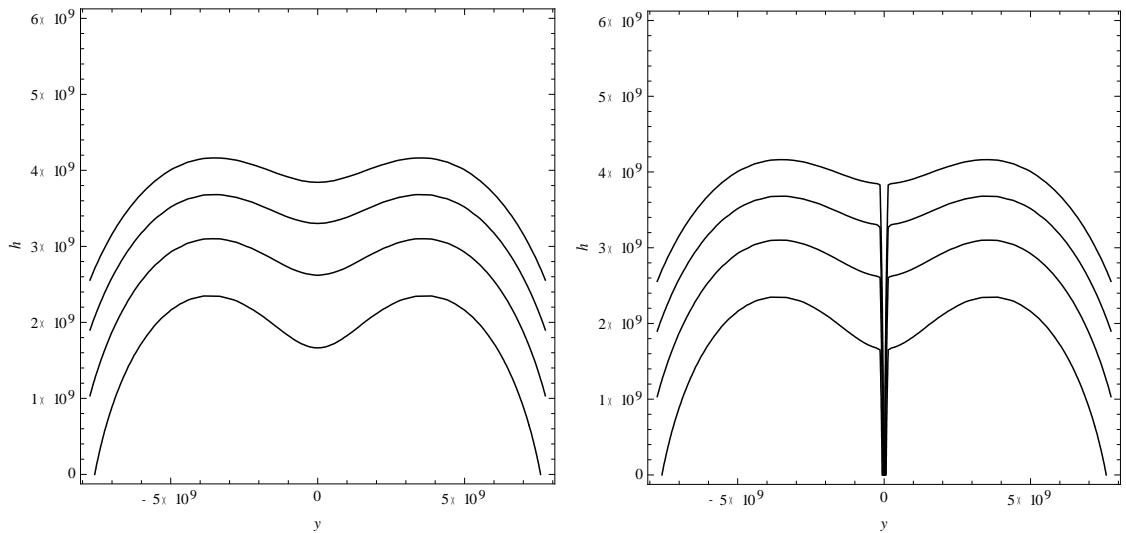
$$Zh3 = \left( \frac{d}{2} + y \right) \} \quad (11)$$

Важным физическим параметром данной задачи, который нам предстоит определить, является характерная ширина области магнитного пересоединения  $b$ .

Как уже было сказано, появление токового слоя приводит к уменьшению интенсивности излучения за счет исчезновения наиболее эффективно излучающих гирорезонансных уровней, что наглядно видно на представленных ниже рис.16-17.

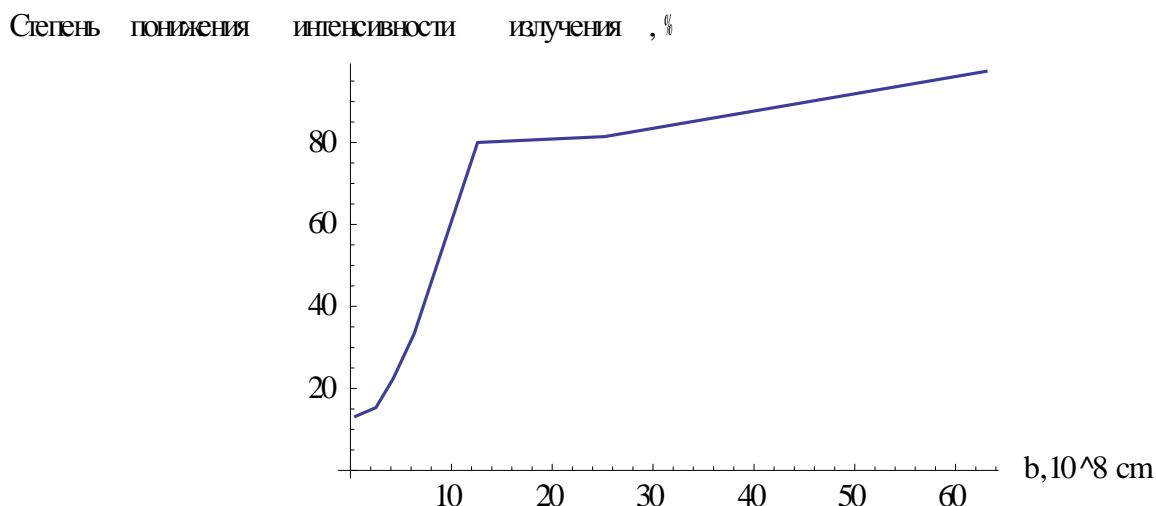


**Рис.16** Силовые линии на частоте 10 ГГц для модели двух диполей(слева) и для модели с токовым слоем (справа).



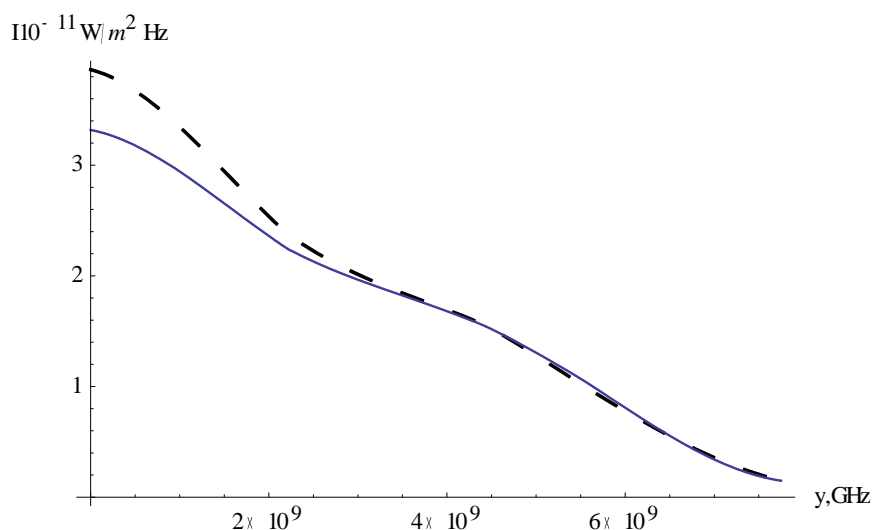
**Рис.17** Гирорезонансные уровни на частоте 10 ГГц на гирогармониках  $s = 2,3,4,5$  для модели двух диполей(слева) и для модели с токовым слоем (справа).

Далее с целью определения характерной ширины области магнитного пересоединения необходимо рассмотреть распределение интенсивности излучения. Из наблюдений известно, что она должна уменьшиться примерно на 10-20%. Исходя из этих соображений, получили зависимость степени понижения интенсивности излучения NLS от размера области магнитного пересоединения  $b$ .



**Рис.18** Степень понижения интенсивности излучения в зависимости от размера области магнитного пересоединения  $b$  на частоте 10 ГГц.

Отсюда видно, что уменьшение интенсивности на частоте 10 ГГц, соответствующее данным наблюдений, достигается, если размер области магнитного пересоединения имеет величину  $b=2,78 \cdot 10^8$  см. При этом параметр задачи  $\sigma = 50$ .

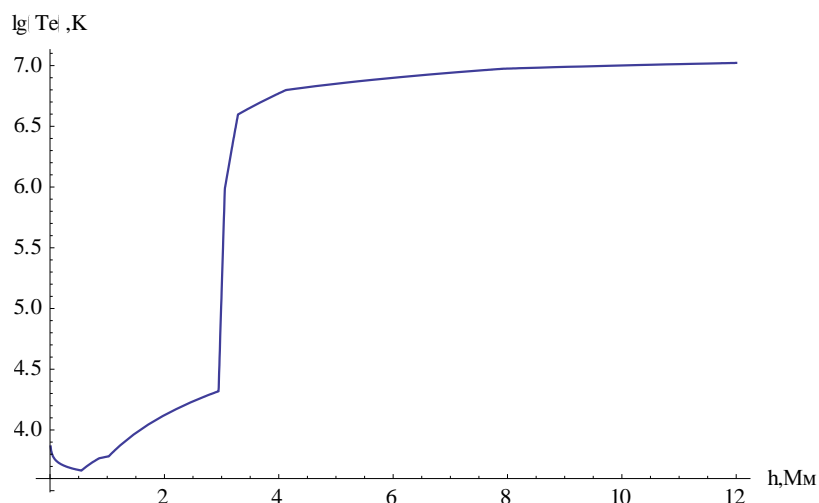


**Рис.19** Распределение параметра Стокса I, усредненное по диаграмме направленности для модели двух диполей (пунктирная линия) и для модели с токовым слоем (сплошная линия) на частоте 10 ГГц.

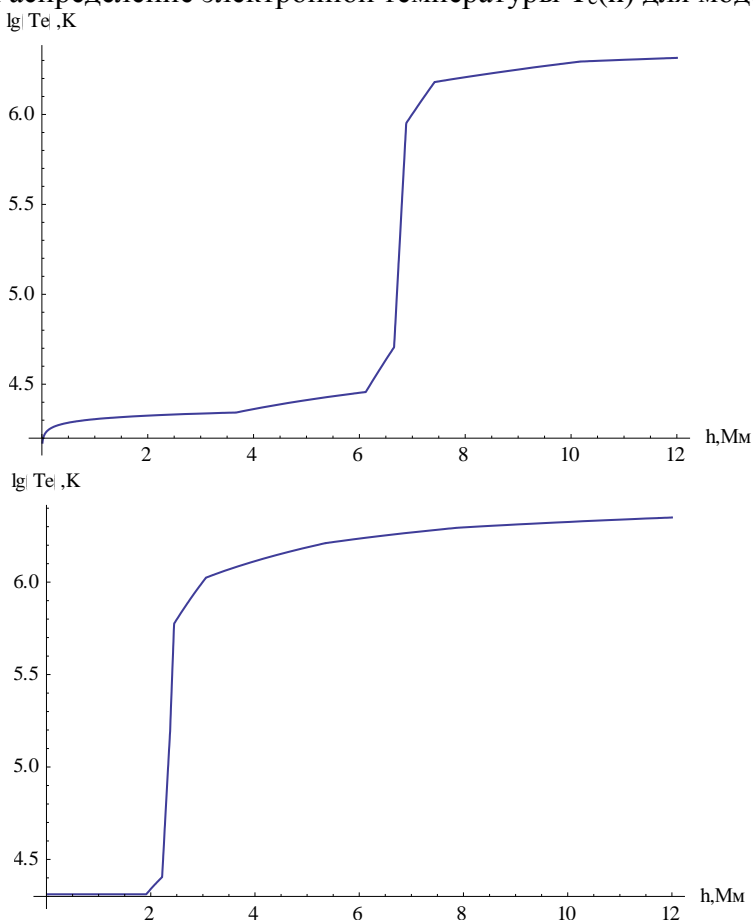
Из приведенных графиков можно увидеть явную зависимость: чем шире область магнитного пересоединения, тем больше степень уменьшения интенсивности NLS перед вспышкой, так как с увеличением ширины токового слоя увеличивается и количество накопленной в нем энергии, которая высвобождается при разрушении токового слоя и преобразуется в тепловую и кинетическую энергию плазмы и потоки высокоэнергетических частиц. Таким образом, можно сделать вывод что область магнитного пересоединения, соответствующая данным наблюдений, должна быть порядка  $b=3 \cdot 10^8$  см.

## 2.3 Модель Мока

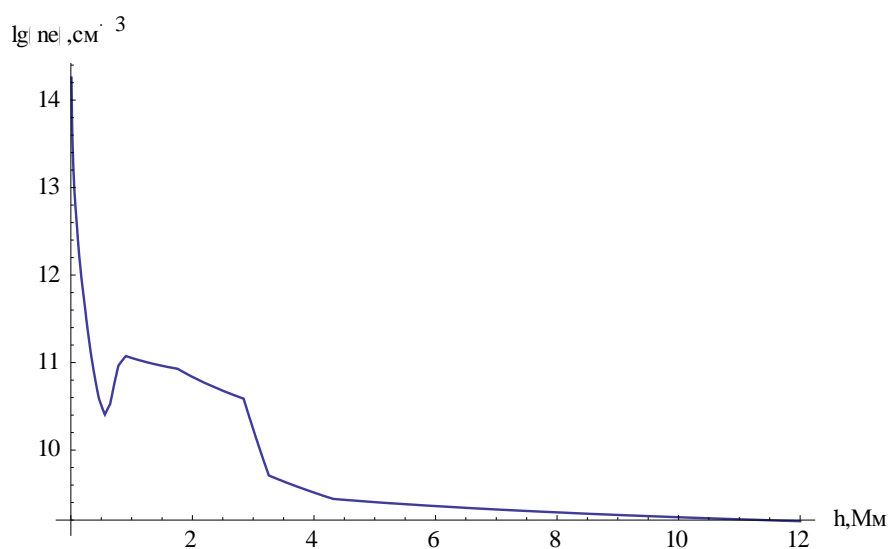
Согласно данным, полученным со спутника SOHO, для активной области AR 7986, наблюдения над которой проводились в августе 1996г., в работе [17] была предложена модель распределения электронной температуры и концентрации для магнитного полюса и для нейтральной линии рядом с ним, отличная от модели Сельхорста, используемой при наших расчетах. Рассмотрим насколько данная модель соответствует наблюдениям активных областей в радиодиапазоне.



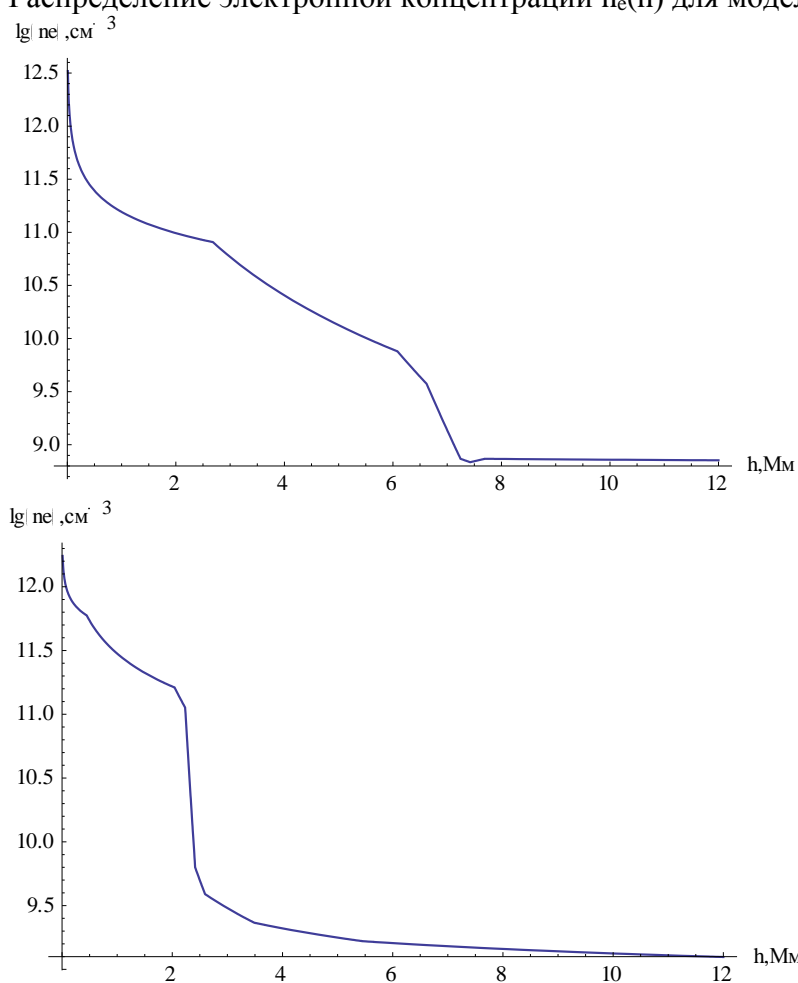
**Рис.20** Распределение электронной температуры  $T_e(h)$  для модели Сельхорста



**Рис.21** Распределение электронной температуры  $T_e(h)$  для модели [17] для нейтральной линии (сверху) и для магнитного полюса (снизу).

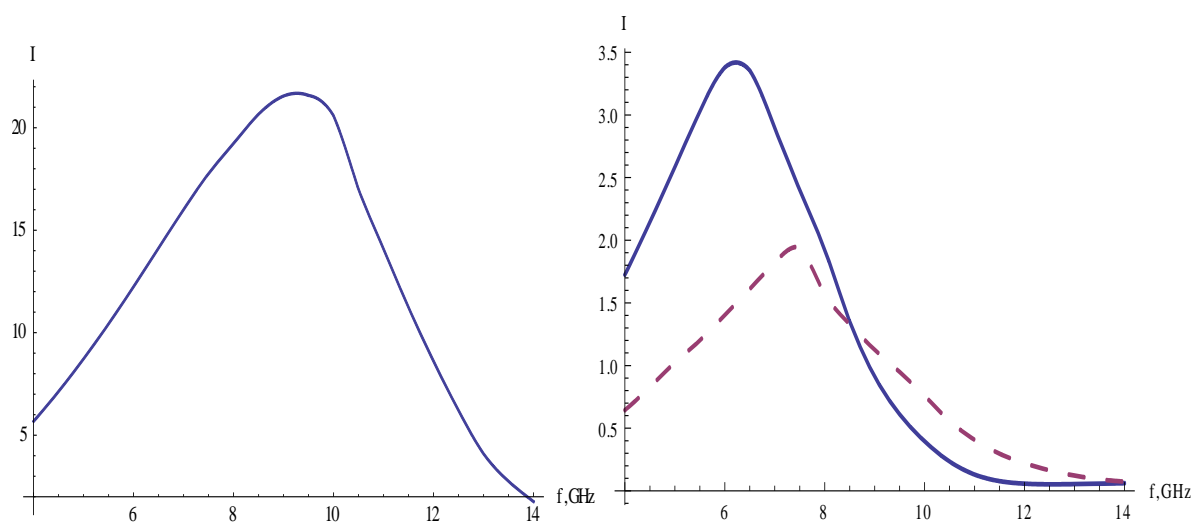


**Рис.22** Распределение электронной концентрации  $n_e(h)$  для модели Сельхорста.



**Рис.23** Распределение электронной концентрации  $n_e(h)$  для модели [17] для нейтральной линии (сверху) и для магнитного полюса (снизу).

В применении к модели двух разнесенных на расстояние  $d=7.74802 \cdot 10^9 \text{ см}$  противоположно направленных диполей с  $B_{ph}=3000 \text{ Гс}$ , модель [17] дает следующие результаты для распределения интенсивности:



**Рис. 24** Спектр параметра Стокса  $I$  для модели Сельхорста (слева), для модели [17] над нейтральной линией (сплошная линия) и над полюсом (пунктир).

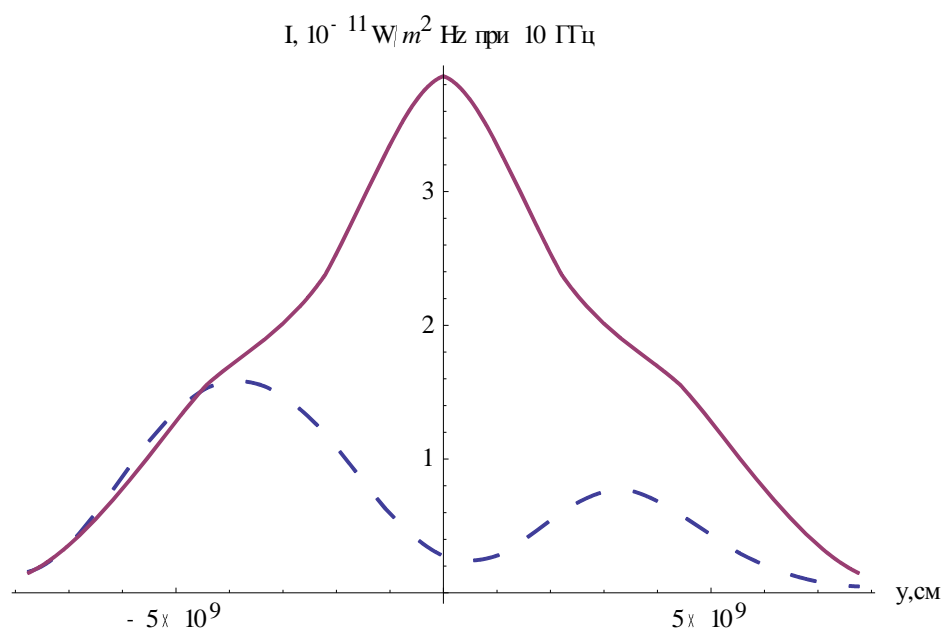
Отсюда видно, что на всех частотах модель [17] дает почти на порядок меньшие значения интенсивности, нежели модель Сельхорста. Таким образом, модель [17] не дает наблюдаемых значений интенсивности и не может быть признана верной.

## Заключение

Целью данной работы являлось рассмотрение связи спектральных характеристик NLS со вспышечной активностью, для чего были предложены две модели, в основе которых лежит модель двух разнесенных противоположно направленных диполей:

- Модель с дополнительным диполем, расположенном на расстоянии  $x$  от основного диполя и с меньшим значением магнитного поля на фотосфере.

Появление магнитного потока противоположной направленности, который в данном случае описывается дополнительным диполем, вблизи уже существующего приводит в NLS к исчезновению наиболее эффективно излучающих гирорезонансных уровней, что в свою очередь приводит к значительному ослаблению излучения.



**Рис.25** Распределение параметра Стокса I на частоте 10 ГГц для модели двух диполей (сплошная линия) и для модели с дополнительным диполем (пунктир).

Из данных наблюдений известно, что интенсивность NLS перед вспышкой уменьшается на 10-20%. Однако согласно рассмотренной модели на частоте 10 ГГц уменьшение интенсивности излучения в области расположения NLS гораздо более значительно – примерно 75%. Однако, при параметрах дополнительного диполя  $x=d/10$  и  $u=32$  уменьшение интенсивности составляет около 20%, что соответствует данным наблюдений.

В результате рассмотрения зависимости спектральных характеристик от параметров дополнительного диполя, а именно его положения относительно основного диполя и величины магнитного поля на фотосфере, пришли к выводу, что чем ближе располагается дополнительный диполь к месту расположения NLS и чем больше величина его магнитного поля, тем заметнее уменьшается интенсивность излучения и степень поляризации.

Таким образом, изменение спектральных характеристик NLS напрямую зависит от параметров дополнительного диполя, причем наиболее ярко эта зависимость проявляется на более высоких частотах (более 6 ГГц).



- Модель с токовым слоем.

Известно, что перед вспышкой формируется токовый слой, неустойчивость которого и приводит к генерации высокоэнергетичных частиц. Поэтому для исследования связи характеристик NLS с эруптивными процессами в исходную модель двух диполей ввели сомножитель, описывающий область магнитного пересоединения. Появление токового слоя приводит к уменьшению интенсивности излучения в области расположения NLS на частоте 10 ГГц на 10-20% (соответствующая зависимость представлена на рис.17). Данный вывод соответствует данным наблюдений, при этом размер области магнитного пересоединения, являющийся важным параметром задачи, должен иметь величину порядка  $b=3 \cdot 10^8$  см.

Таким образом, каждая из предложенных моделей качественно описывает поведение NLS, хотя представление о формировании токового слоя является более обоснованным с физической точки зрения.

Кроме того в данной работе была рассмотрена модель Мока для распределения электронной температуры и концентрации в применении к лежащей в основе нашей работы модели двух диполей. В результате сравнения спектров интенсивности для этой новой модели с используемой при расчетах моделью Сельхорста, приходим к выводу о несостоятельности модели Мока с точки зрения соответствия данным наблюдений, так как даваемые ею значения интенсивности излучения на порядок меньше тех, что соответствуют наблюдаемым, и которые хорошо описываются моделью Сельхорста.

## Литература

1. Сыроватский С.И., «К вопросу об устойчивости плазмы в неоднородном магнитном поле и о механизме солнечных вспышек», *Астроном. Журн.*, 39, 987 (1962)
2. Kundu M.R., Alissandrakis C.E., Bregman J.D., and Hin A.C. 1977, *Astrophysical Journal*, 213, 278-295
3. Alissandrakis C. E., Kundu M. R. Observations of ring structure in a sunspot associated source at 6 centimeter wavelength. *Astroph. J.* 1982, V.253, P. L49
4. Kundu M.R., Alissandrakis C.E. Structure and polarization of active region microwave emission. *Solar Phys.*, 1984. V. 94. P. 249
5. Sych R.A., Uralov A.M., Korzhavin A.N. Radio observations of compact solar sources located between sunspots. *Solar Phys.*, 1993, V. 144. P. 59.
6. Uralov A.M., Grechnev V.V., Rudenko G.V., Rudenko I.G., Nakajima H. Microwave Neutral Line Associated Source and a Current Sheet. *Solar Phys.* 2008, V. 249. P. 315.
7. Lang K.R., Willson R.F., Kile J.N., Lemen J., Strong K.T., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Abramov V.E., Svetkov S.V. Magnetospheres of Solar Active Regions Inferred from Spectral-Polarization Observations with High Spatial Resolution. *Astrophysical Journal*. 1993. V. 419. P. 398
8. Уралов А.М., Руденко Г.В., Гречнев В.В. и др., Труды Всеросс. конф. CAO РАН, 2006г, Санкт-Петербург, 484-514, 2007
9. Somov B.V. Non-neutral current sheets and solar flare energetics. *Astron. & Astrophys.* 1986. V. 163. P. 210.
10. Kundu M. R. and Velusamy T., 1980; Kundu M. R., Schmahl and Rao, 1981; Strong, Alissandrakis C.E., and Kundu M. R., 1984; Gelfreikh, 1985; Akhmedov S.B. et al., 1986; Chiuderi-Drago, Alissandrakis C.E., and Hagyard, 1987; Borovik V.N., Vatrushin S.M., and Korzhavin A.N., 1989; Alissandrakis C.E., et al., 1993; Sych R.A., Uralov A.M, and Korzhavin A.N., 1993; Uralov A.M et al., 1998; Lee et al., 1997; Uralov et al., 1998; Uralov A.M, et al., 2000; Uralov A.M, et al., 2008; Bogod V.M., Kaltman, and Yasnov L.V., 2012
11. Borovik V.N., Grigorieva I.U., Korzhavin A.N., 2012
12. Yasnov L.V, *Solar Phys.* 289, 1215 (2014)
13. Богод В.М., Курочкин Е.А., Яснoв Л.В., 2016, *Астроф. Бюлл.*, (в печати)
14. Прист Э., Форбс Т., Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения, 2005.
15. Selhorst, Silva-Válio, and Costa, 2008
16. Железняков В.В. Излучение в астрофизической плазме, 1997
17. Yung Mok, Zoran Mikic, Roberto Lionello, and Jon A. Linker. Calculating the thermal structure of Solar active regions in three dimensions. *The Astrophysical Journal*, 621:1098–1108, 2005.

## Приложение 1

Данное приложение содержит формулы, описывающие модель двух разнесенных, противоположно направленных диполя.

1. Первый диполь. Компоненты магнитного поля в плоскости h-y (высота – координата в фотосферной плоскости).

$$B_{1h}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \left( 2(h + r_0)^2 - \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)$$

$$B_{1y}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} 3(h + r_0) \left( y + \frac{d}{2} \right)$$

2. Второй диполь. Компоненты магнитного поля.

$$B_{2h}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \left( 2(h + r_0)^2 - \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)$$

$$B_{2y}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} 3(h + r_0) \left( y - \frac{d}{2} \right)$$

3. Расстояние между диполями при заданном магнитном поле между диполями –Bnls и глубине погружения диполя под фотосферу – r<sub>o</sub>.

$$d = \sqrt{1024Bnls^2 r_o^{10} + (-9216M^2 r_o^2 + 1280Bnls^2 r_o^8)x + 640Bnls^2 r_o^6 x^2 + 160Bnls^2 r_o^4 x^3 + 20Bnls^2 r_o^2 x^4 + Bnls^2 x^5}$$

4. Напряженность магнитного поля с двумя диполями.

$$b(h, y) = M \sqrt{\left( \frac{3(h + r_0) \left( -\frac{d}{2} + y \right)}{\left( (h + r_0)^2 + \left( -\frac{d}{2} + y \right)^2 \right)^{5/2}} - \frac{3(h + r_0) \left( \frac{d}{2} + y \right)}{\left( (h + r_0)^2 + \left( \frac{d}{2} + y \right)^2 \right)^{5/2}} \right)^2 + \left( \frac{(2(h + r_0)^2 - \frac{1}{4}(d - 2y)^2)}{\left( (h + r_0)^2 + \left( -\frac{d}{2} + y \right)^2 \right)^{5/2}} - \frac{(2(h + r_0)^2 - \frac{1}{4}(d + 2y)^2)}{\left( (h + r_0)^2 + \left( \frac{d}{2} + y \right)^2 \right)^{5/2}} \right)^2}$$

5. Градиент магнитного поля:

$$L_b = \left| \frac{\frac{Sq1}{Zn1^2} + \frac{Sq2}{Zn2^2}}{\frac{4(h+ro)}{Zn1^2 Sq1} - \frac{4(h+ro)Sq1}{Zn1^3} + \frac{4(h+ro)}{Zn2^2 Sq2} - \frac{4(h+ro)Sq2}{Zn2^3}} \right|, \text{ где}$$

$$Sq1 = \sqrt{4(h+ro)^2 + \left(-\frac{d}{2} + y\right)^2},$$

$$Sq2 = \sqrt{4(h+ro)^2 + \left(\frac{d}{2} + y\right)^2},$$

$$Zn1 = \left((h+ro)^2 + \left(-\frac{d}{2} + y\right)^2\right),$$

$$Zn2 = ((h+ro)^2 + \left(\frac{d}{2} + y\right)^2)\}$$

## Приложение 2

Данное приложение содержит формулы, описывающие модель с дополнительным диполем:

1. Первый диполь. Компоненты магнитного поля.

$$B_{1h}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \left( 2(h + r_0)^2 - \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)$$
$$B_{1y}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} 3(h + r_0) \left( y + \frac{d}{2} \right)$$

2. Второй диполь. Компоненты магнитного поля.

$$B_{2h}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \left( 2(h + r_0)^2 - \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)$$
$$B_{2y}(h, y) = M \left( (h + r_0)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} 3(h + r_0) \left( y - \frac{d}{2} \right)$$

3. Дополнительный диполь. Компоненты магнитного поля.

$$B_{dh}(h, y) = Md \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} - x \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} \left( 2(h + r_0)^2 - \left( y + \frac{d}{2} - x \right)^2 \right)$$
$$B_{dy}(h, y) = Md \left( (h + r_0)^2 + \left( y + \frac{d}{2} - x \right)^2 \right)^{-\frac{5}{2}} 3(h + r_0) \left( y + \frac{d}{2} - x \right)$$

Параметр  $x$  характеризует положение дополнительного диполя относительно основного.

4. Расстояние между основными диполями при заданном магнитном поле между диполями  $-B_{nl}$  и глубине погружения диполя под фотосферу  $-r_0$ .

$$d = \sqrt{1024 B_{nl}^2 r_0^{10} + (-9216 M^2 r_0^2 + 1280 B_{nl}^2 r_0^8) x + 640 B_{nl}^2 r_0^6 x^2 + 160 B_{nl}^2 r_0^4 x^3 + 20 B_{nl}^2 r_0^2 x^4 + B_{nl}^2 x^5}$$

5. Напряженность магнитного поля с тремя диполями.

$$b(h, y) = \sqrt{\left( \begin{aligned} & -\frac{3M(h+ro)\left(-\frac{d}{2}+y\right)}{\left((h+ro)^2+\left(-\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} + \frac{3M(h+ro)\left(\frac{d}{2}+y\right)}{\left((h+ro)^2+\left(\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} + \\ & + \frac{3Md(h+ro)\left(\frac{d}{2}+y-x\right)}{\left((h+ro)^2+\left(\frac{d}{2}+y-x\right)^2\right)^{5/2}} \end{aligned} \right)^2 + \left( \begin{aligned} & -\frac{M\left(2(h+ro)^2-\frac{1}{4}(-d+2y)^2\right)}{\left((h+ro)^2+\left(-\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} + \frac{M\left(2(h+ro)^2-\frac{1}{4}(d+2y)^2\right)}{\left((h+ro)^2+\left(\frac{d}{2}+y\right)^2\right)^{5/2}} + \\ & + \frac{Md\left(2(h+ro)^2-\frac{1}{4}(d+2y-2x)^2\right)}{\left((h+ro)^2+\left(\frac{d}{2}+y-x\right)^2\right)^{5/2}} \end{aligned} \right)^2}$$

6. Градиент магнитного поля:

$$L_b = \left| \frac{\left( \left( \frac{3Zh1Zh2}{Zn1^{5/2}} - \frac{3Zh1Zh3}{Zn2^{5/2}} \right)^2 + \left( \frac{Zp1}{Zn1^{5/2}} - \frac{Zp2}{Zn2^{5/2}} \right)^2 \right)}{\left( \left( -\frac{15Zh1^2Zh2}{Zn1^{7/2}} + \frac{3Zh2}{Zn1^{5/2}} + \frac{15Zh1^2Zh3}{Zn2^{7/2}} - \frac{3Zh3}{Zn2^{5/2}} \right) \left( \frac{3Zh1Zh2}{Zn1^{5/2}} - \frac{3Zh1Zh3}{Zn2^{5/2}} \right) + \right.}, \text{ где}$$

$$Zn1 = (h+ro)^2 + \left(-\frac{d}{2}+y\right)^2,$$

$$Zn2 = (h+ro)^2 + \left(\frac{d}{2}+y\right)^2,$$

$$Zp1 = 2(h+ro)^2 - \frac{1}{4}(d-2y)^2,$$

$$Zp2 = 2(h+ro)^2 - \frac{1}{4}(d+2y)^2,$$

$$Zh1 = (h+ro),$$

$$Zh2 = \left(-\frac{d}{2}+y\right),$$

$$Zh3 = \left(\frac{d}{2}+y\right)\}$$